

## UCC25600 8 引脚高性能谐振模式控制器

### 1 特性

- 可变开关频率控制
- 精度为 4% 的可编程最小开关频率 (在以下温度范围内具有 3% 的精度:  $-20^{\circ}\text{C}$  至  $105^{\circ}\text{C}$ )
- 可编程最大开关频率
- 通过可编程死区时间实现最佳效率
- 可编程软启动时间
- 简便的开/关控制
- 过流保护
- 过热保护
- 偏置电压 UVLO 和过压保护
- 具有 0.4A 拉电流和 0.8A 灌电流能力的集成栅极驱动器
- 工作温度范围:  $-40^{\circ}\text{C}$  至  $125^{\circ}\text{C}$
- SOIC 8 引脚封装

### 2 应用

- 100W 至 1kW 电源
- LCD、等离子和 DLP® 电视
- 适配器、计算和 ATX 电源
- 家用音频系统
- 电子照明镇流器

### 3 说明

UCC25600 高性能、谐振模式控制器设计用于采用谐振拓扑的直流/直流应用，尤其是 LLC 半桥谐振转换器。这款高度集成的控制器在仅 8 引脚封装中实现了频率调制控制和完整的系统功能。切换到 UCC25600 将极大地简化系统设计和布局，并缩短产品上市时间，而价格却低于竞争对手的 16 引脚器件产品。

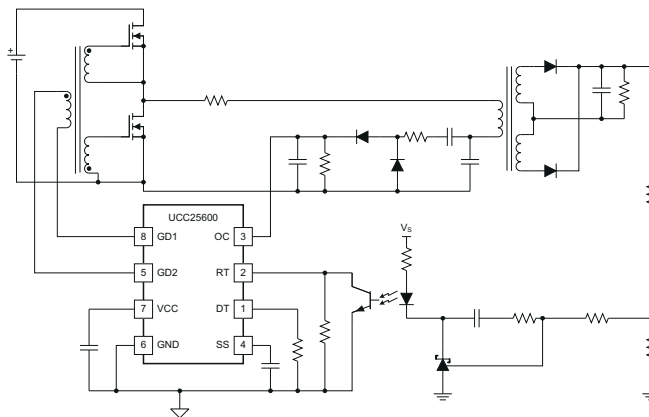
内部振荡器支持 40kHz 至 350kHz 范围内的开关频率。这个高精度振荡器以 4% 的容差实现了最小开关频率限值，从而使得设计人员能够避免功率级的过度设计，从而进一步降低总体系统成本。可编程死区时间支持以最小磁化电流实现零电压开关。这样可以在各种应用中尽可能地提高系统效率。可编程软启动计时器极大地提高了设计灵活性，能够满足采用半桥拓扑的终端设备的各种要求。通过结合 0.4A 拉电流和 0.8A 灌电流的驱动能力，可靠的低成本栅极驱动器变压器成为一个切实可行的选择。

UCC25600 具有全套的系统保护功能，其中包括过流、UVLO、辅助电源 OVP 和过热保护。

#### 器件信息 (1)

器件型号	封装	本体尺寸 (标称值)
UCC25600	SOIC (8)	3.91mm × 4.90mm

(1) 如需了解所有可用封装，请参阅数据表末尾的可订购产品附录。



典型应用图



## 内容

1 特性.....	1	7.3 特性说明.....	10
2 应用.....	1	7.4 器件功能模式.....	13
3 说明.....	1	8 应用和实施.....	14
4 修订历史记录.....	2	8.1 应用信息.....	14
5 引脚配置和功能.....	3	8.2 典型应用.....	18
6 规格.....	4	9 电源相关建议.....	22
6.1 绝对最大额定值.....	4	10 布局.....	22
6.2 ESD 等级.....	4	10.1 布局指南.....	22
6.3 建议运行条件.....	4	10.2 布局示例.....	23
6.4 热性能信息.....	4	11 器件和文档支持.....	24
6.5 电气特性.....	5	11.1 支持资源.....	24
6.6 典型特性.....	7	11.2 商标.....	24
7 详细说明.....	9	11.3 静电放电警告.....	24
7.1 概述.....	9	12 术语表.....	24
7.2 功能方框图.....	9	13 机械、封装和可订购信息.....	24

## 4 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

### Changes from Revision C (July 2015) to Revision D (August 2024) Page

- 通篇更新了表格、图和交叉参考的编号格式..... 1

### Changes from Revision B (June 2011) to Revision C (July 2015) Page

- 添加了 ESD 等级表、特性说明部分、器件功能模式、应用和实施部分、电源相关建议部分、布局部分、器件和文档支持部分以及机械、封装和可订购信息部分..... 1

### Changes from Revision A (September 2008) to Revision B (June 2011) Page

- 更改了工作温度范围，以便与“电气规格”保持一致..... 1

## 5 引脚配置和功能

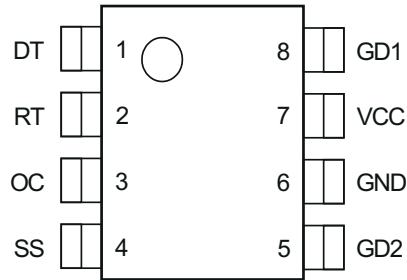


图 5-1. D 封装 8 引脚 SOIC 顶视图

表 5-1. 引脚功能

引脚		I/O	说明
名称	编号		
DT	1	I	该引脚可设置高侧和低侧开关驱动信号的死区时间。将一个电阻器接地。利用内部 2.25V 电压基准，流经电阻器的电流可设置死区时间。为了防止在该引脚意外接地短路时发生击穿，最小死区时间设置为 120ns。如果设置的死区时间小于 120ns，系统会自动将死区时间调整为 120ns。
GD1	8	O	高侧和低侧开关栅极驱动器。将栅极驱动器变压器初级侧连接到这两个引脚以驱动半桥。
GD2	5		
GND	6	—	接地
OC	3	I	过流保护引脚。当该引脚上的电压超过 1V 时，栅极驱动器信号会被主动拉至低电平。在电压低于 0.6V 后，栅极驱动器信号会通过软启动恢复。当 OC 引脚电压高于 2V 时，器件会闭锁。将 VCC 拉至低于 UVLO 电平时，则会将过流锁存复位为关闭。
RT	2	I	流出该引脚的电流设置栅极驱动器信号的频率。将光耦合器集电极连接到此引脚可以控制开关频率，从而进行调节。将一个电阻器并联接地可以设置流出引脚的最小电流并设置最小开关频率。要设置最大开关频率限制，只需将一个电阻器与光耦合器晶体管串联即可。该电阻器可设置流出该引脚的最大电流并限制最大开关频率。
SS	4	I	软启动引脚。该引脚可设置系统的软启动时间。将一个电容器接地。将此引脚拉至低于 1V 将禁用此器件，以实现简单的开/关控制。软启动功能会在所有故障条件后启用，包括辅助电源 OV、UVLO、过流保护和过热保护。
VCC	7	—	辅助电源。将此引脚连接到低于 20V 的电源。将一个 1 $\mu$ F 电容器并联接地可以滤除噪声。

## 6 规格

### 6.1 绝对最大额定值

在自然通风条件下的工作温度范围内测得 (除非另有说明) <sup>(1)</sup>

	最小值	最大值	单位
电源电压, VCC		22	V
电压, GD1、GD2	-0.5	VCC + 0.5	V
栅极驱动电流 - 连续, GD1、GD2		±25	mA
电流, RT		-5	mA
电流, DT		-0.7	mA
引线温度 (10 秒)		260	°C
工作结温, T <sub>J</sub>	-40	125	°C
贮存温度, T <sub>stg</sub>	-65	150	°C

(1) 应力超出绝对最大额定值下面列出的值可能会对器件造成永久损坏。这些仅仅是应力额定值, 并不意味着器件在这些条件或超出 [建议运行条件](#) 下的任何其它条件下能够正常工作。长时间处于绝对最大额定条件下可能会影响器件的可靠性。

### 6.2 ESD 等级

		值	单位
V <sub>(ESD)</sub> 静电放电	人体放电模型 (HBM), 符合 ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 标准, 所有引脚 <sup>(1)</sup>	±2000	V
	充电器件模型 (CDM), 符合 JEDEC 规范 JESD22-C101, 所有引脚 <sup>(2)</sup>	±500	

(1) JEDEC 文档 JEP155 指出: 500V HBM 时能够在标准 ESD 控制流程下安全生产。

(2) JEDEC 文档 JEP157 指出: 250V CDM 时能够在标准 ESD 控制流程下安全生产。

### 6.3 建议运行条件

在自然通风条件下的工作温度范围内测得 (除非另有说明)

	最小值	标称值	最大值	单位
来自低阻抗源的 VCC 输入电压	11.5		18.0	V
RT 电阻	1		8.666	kΩ
DT 电阻	3.3		39	kΩ
SS 电容器	0.01		1	μF

### 6.4 热性能信息

热性能指标 <sup>(1)</sup>		UCC25600	单位
		D (SOIC)	
		8 引脚	
R <sub>θJA</sub>	结至环境热阻	118.5	°C/W
R <sub>θJC(top)</sub>	结至外壳 (顶部) 热阻	72.5	°C/W
R <sub>θJB</sub>	结至电路板热阻	58.9	°C/W
ψ <sub>JT</sub>	结至顶部特征参数	24.1	°C/W
ψ <sub>JB</sub>	结至电路板特征参数	58.4	°C/W

(1) 有关新旧热指标的更多信息, 请参阅 [半导体和 IC 封装热指标应用报告](#), [SPRA953](#)。

## 6.5 电气特性

在自然通风条件下的工作温度范围内测得 ( 除非另有说明 )

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
<b>辅助电源 (VCC)</b>						
VCC 电流 ( 已禁用 )		SS = 0V		1	1.5	mA
VCC 电流 ( 已启用 )		SS = 5V , C <sub>GD1</sub> = C <sub>GD2</sub> = 1nF	2.5	5	7.5	mA
VCC 电流 (UVLO)		VCC = 9V		100	400	μA
V <sub>UVLO</sub>	UVLO 开启阈值	在 VCC 上升时测得	9.9	10.5	11.1	V
	UVLO 关闭阈值	在 VCC 下降时测得	8.9	9.5	10.1	V
	UVLO 迟滞	在 VCC 下测得	0.7	1	1.3	V
V <sub>OVP</sub>	OVP 关闭阈值	在 VCC 上升时测得	18	20	22	V
	OVP 开启阈值	在 VCC 下降时测得	16	18	20	V
	OVP 迟滞	在 VCC 下测得	1.5	2	2.5	V
<b>死区时间 (DT)</b>						
T <sub>DT</sub>	死区时间	R <sub>DT</sub> = 16.9kΩ	390	420	450	ns
<b>振荡器</b>						
F <sub>SW(min)</sub>	GD1、GD2 处的最小开关频率	-40°C 至 125°C	40.04	41.70	43.36	kHz
		-20°C 至 105°C	40.45	41.70	42.95	
K <sub>ICO</sub>	开关频率增益/I (RT)	R <sub>RT</sub> = 4.7kΩ , I <sub>RT</sub> = 0mA 至 1mA	60	80	100	Hz/μA
	GD1、GD2 导通时间不匹配		-50		50	ns
F <sub>SW_BM</sub>	启动突发模式时的开关频率	SS = 5V	300	350	400	kHz
	退出突发模式时的开关频率	SS = 5V	280	330	380	kHz
F <sub>SW(start)</sub>	软启动时的开关频率	-40°C 至 125°C	122	142.5	162	kHz
		-20°C 至 105°C	125	142.5	160	
<b>外部禁用/软启动</b>						
	启用阈值	在 SS 上升时测量	1.1	1.2	1.3	V
	禁用阈值	在 SS 下降时测得	0.85	1	1.1	V
	禁用迟滞	在 SS 下测得	0.15		0.35	V
	禁用传播延迟	在 SS ( 下降 ) 和 GD2 ( 下降 ) 之间测得	250	500	750	ns
I <sub>SS</sub>	ISS 引脚上的拉电流	V <sub>SS</sub> = 0.5V	-225	-175	-125	μA
		V <sub>SS</sub> = 1.35V	-5.5	-5	-4.5	
<b>峰值电流限制</b>						
V <sub>OC1(off)</sub>	1 级过流阈值 - V <sub>OC</sub> 上升		0.9	1	1.1	V
V <sub>OC2(off)</sub>	2 级过流锁存阈值 - V <sub>OC</sub> 上升		1.8	2.0	2.2	V
V <sub>OC1(on)</sub>	1 级过流阈值 - V <sub>OC</sub> 下降		0.5	0.6	0.7	V
T <sub>d_OC</sub>	传播延迟		60	200	500	ns
I <sub>OC</sub>	OC 偏置电流	V <sub>OC</sub> = 0.8V	-200		200	nA

## 6.5 电气特性 (续)

在自然通风条件下的工作温度范围内测得 (除非另有说明)

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
<b>栅极驱动</b>					
GD1、GD2 输出电压高电平	$I_{GD1}$ 、 $I_{GD2} = -20\text{mA}$	9		11	V
GD1、GD2 导通电阻 (高电平)	$I_{GD1}$ 、 $I_{GD2} = -20\text{mA}$		12	30	$\Omega$
GD1、GD2 输出电压低电平	$I_{GD1}$ 、 $I_{GD2} = 20\text{mA}$		0.08	0.2	V
GD1、GD2 导通电阻 (低电平)	$I_{GD1}$ 、 $I_{GD2} = 20\text{mA}$		4	10	$\Omega$
上升时间 GDx	1V 至 9V, $C_{LOAD} = 1\text{nF}$		18	35	ns
下降时间 GDx	9V 至 1V, $C_{LOAD} = 1\text{nF}$		12	25	
UVLO 期间的 GD1、GD2 输出电压	$V_{CC} = 6\text{V}$ , $I_{GD1}$ 、 $I_{GD2} = 1.2\text{mA}$	0.5		1.75	V
<b>热关断</b>					
热关断阈值			160		$^{\circ}\text{C}$
热关断恢复阈值			140		$^{\circ}\text{C}$

## 6.6 典型特性

除非另有说明，否则  $V_{CC} = 12V$ 、 $R_{RT} = 4.7k\Omega$ 、 $R_{DT} = 16.9k\Omega$ 、 $V_{SS} = 5V$ 、 $V_{OC} = 0V$ ；所有电压均以 GND 为基准且  $T_J = T_A = 25^\circ C$ 。

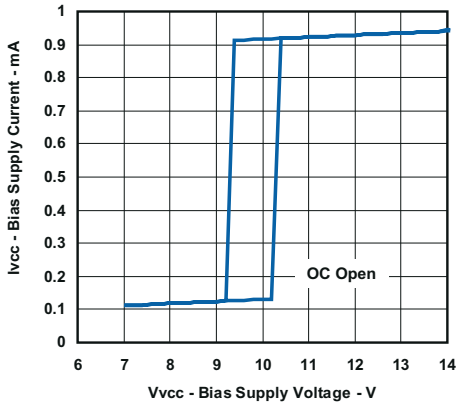


图 6-1. 辅助电源电流与辅助电源电压间的关系

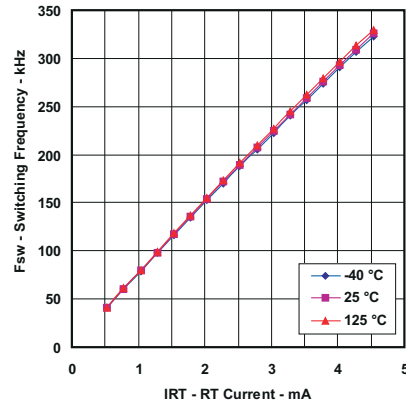


图 6-2. 开关频率与 RT 电流间的关系

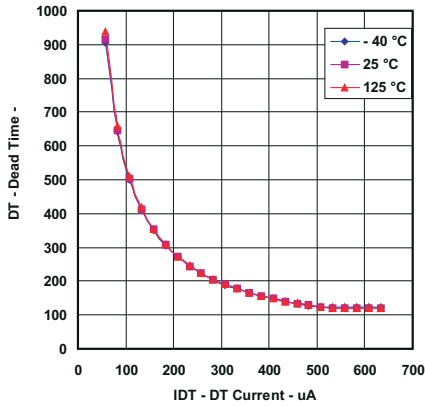


图 6-3. 死区时间与 DT 电流间的关系

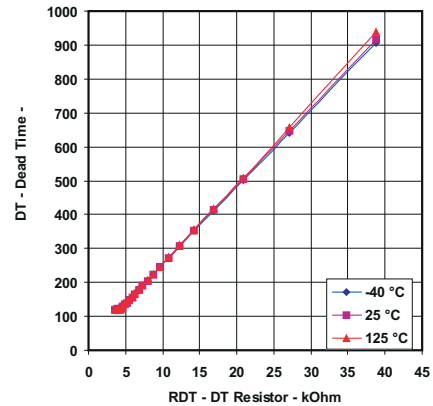


图 6-4. 死区时间与 DT 电阻间的关系

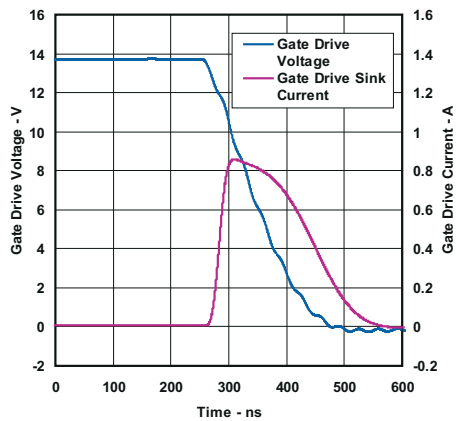


图 6-5. 栅极驱动下降,  $V_{CC} = 15V$

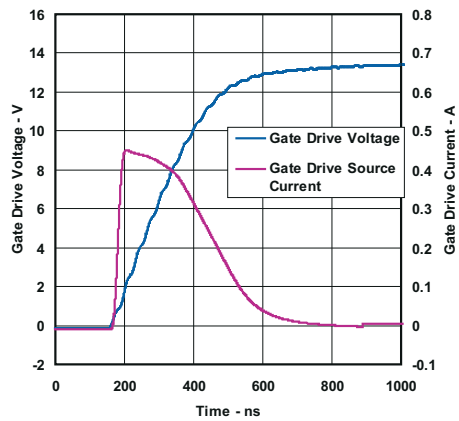


图 6-6. 栅极驱动上升,  $V_{CC} = 15V$

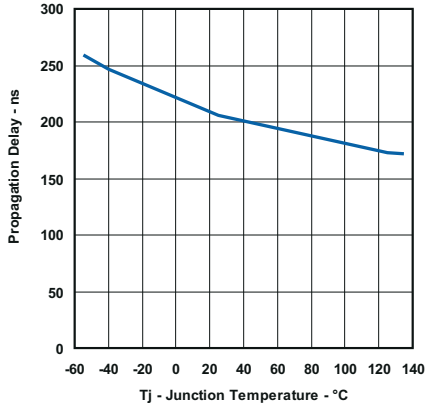


图 6-7. 过流传播延迟与温度间的关系

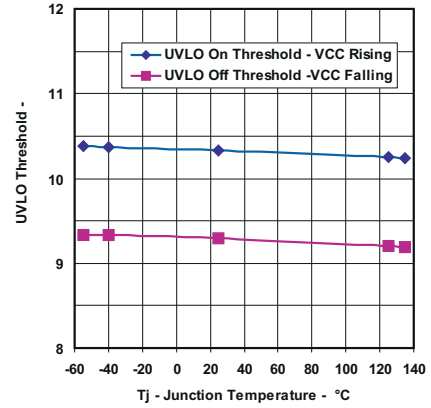


图 6-8. UVLO 阈值与温度间的关系

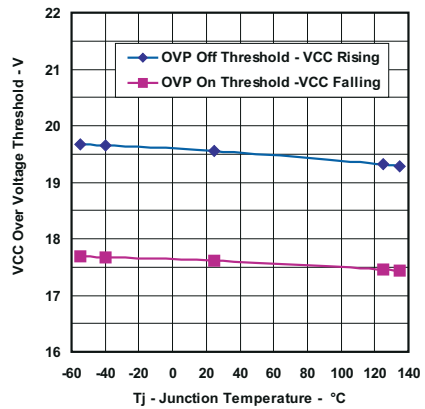


图 6-9. VCC 过压阈值与温度间的关系

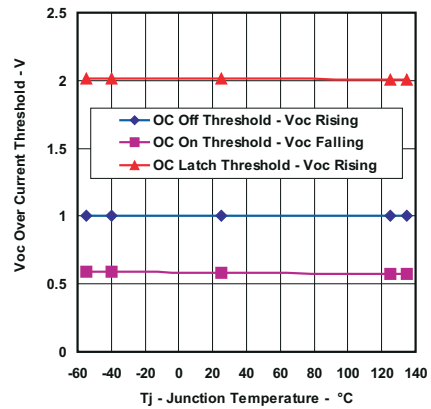


图 6-10. 过流阈值与温度间的关系

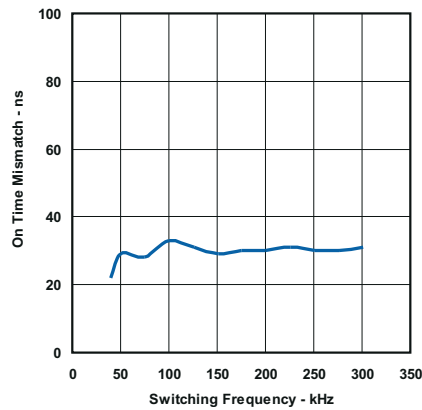


图 6-11. 导通时间失配与开关频率间的关系



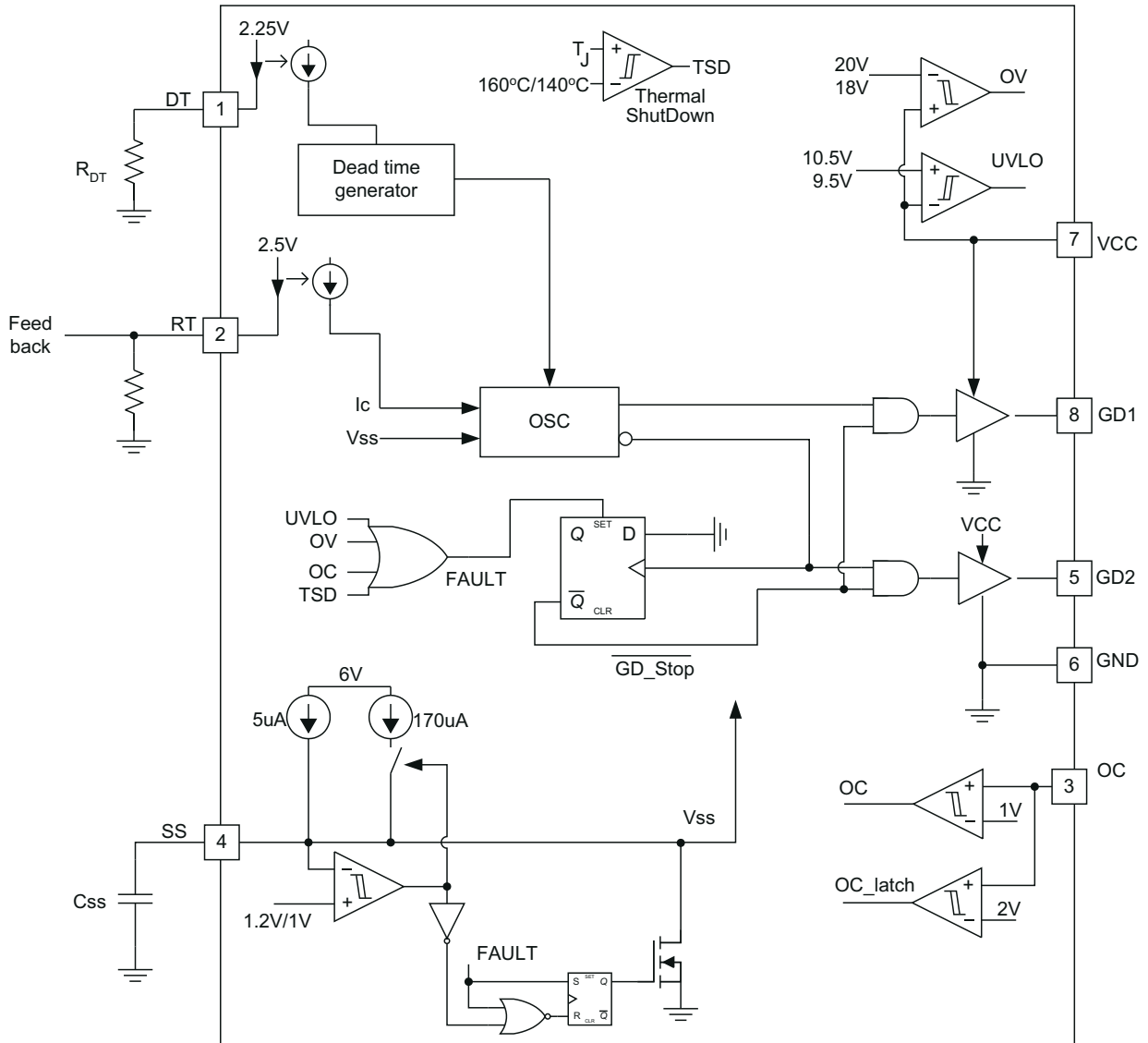
## 7 详细说明

### 7.1 概述

由于高功率密度和高效率要求，许多应用中都采用了 LLC 拓扑。与硬开关桥拓扑和相移全桥相比，LLC 谐振转换器具有许多独特的特性和改进。例如，LLC 具有简单的结构，可以实现从空载到满载的初级 MOSFET 零电压开关 (ZVS) 和次级整流器零电流开关 (ZCS)。

UCC25600 器件是一款 LLC 谐振半桥接控制器，集成了内置的先进高效升压功能与高级保护功能，从而提供了具有成本效益的解决方案。

### 7.2 功能方框图



## 7.3 特性说明

### 7.3.1 软启动

在启动和故障恢复条件下，始终会执行软启动以防止谐振回路电流过大，并确保零电压开关 (ZVS)。在软启动期间，开关频率会增加。软启动时间可以通过在 SS 引脚与地之间连接一个电容器来进行编程。

软启动引脚还用作器件的开/关控制引脚。通过将 SS 引脚主动拉至 1V 以下，该器件会被禁用。移除下拉电阻后，SS 引脚电压会因内部充电电流而升高。在 SS 引脚电压高于 1.2V 后，该器件便开始生成栅极驱动器信号并进入软启动模式。软启动的时间序列如图 7-1 所示。

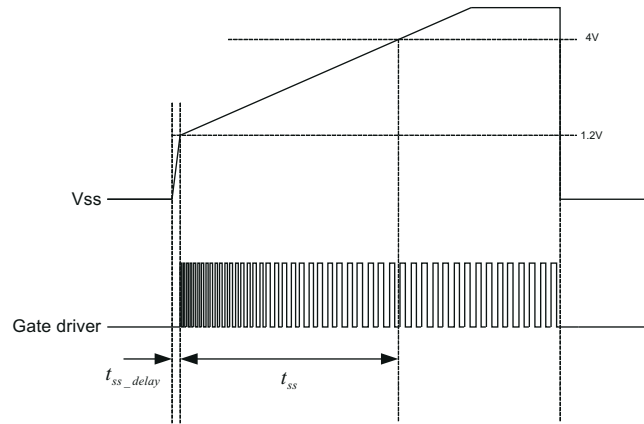


图 7-1. 软启动序列

为了防止开启命令和栅极驱动器信号出现之间存在长延迟，SS 引脚电流设置为两个不同的电平。当 SS 引脚电压低于 1.2V 时，其输出电流为 175  $\mu$ A。这种高电流可在短时间内将软启动引脚电容器充电至 1.2V，并可缩短延时时间。该延时时间可以通过以下公式进行计算：

$$t_{SS\_delay} = \frac{1.2V}{175\mu A} C_{SS} \quad (1)$$

软启动期间的开关频率由流出 RT 引脚的电流和 SS 引脚上的电压决定。开关频率可根据以下公式计算：

$$f_s = \frac{1}{2} \frac{1}{\frac{6ns \times 1A}{I_{RT} + \left(1.81mA - \frac{V_{SS}}{2.2k\Omega}\right)} + 150ns} \quad (2)$$

SS 引脚电压达到 4V 后，软启动周期完成，开关频率变为 RT 引脚电流所需的相同值。将 SS 引脚从 1.2V 充电到 4V 所用的时间定义为软启动时间，计算公式如下：

$$t_{SS} = \frac{2.8V}{5\mu A} C_{SS} \quad (3)$$

为了确保可靠运行，栅极驱动器会在 GD2 变为高电平时重新启动。这可以避免系统启动期间的不确定性。

### 7.3.2 过流保护

为防止功率级在过大负载电流情况下发生故障，UCC25600 提供了过流保护功能。借助专用 OC 引脚，当 OC 引脚电压高于 1V 时，功率级会关断。在 OC 引脚电压低于 0.6V 后，栅极驱动器通过软启动恢复。为了增强系统安全性，当 OC 引脚变为 2V 以上时，UCC25600 会锁存整个系统。将 VCC 降至 UVLO 电平以下即可复位器件。

通过使用图 7-2 所示的检测网络，可通过谐振电容器两端的电压间接检测电流。

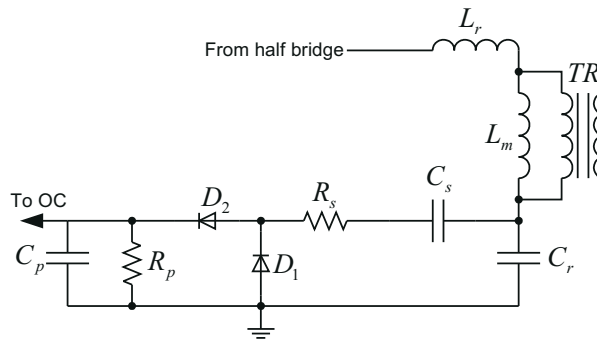


图 7-2. LLC 谐振转换器的电流检测

这种检测方法的基本概念是，谐振电容器两端的交流电压与负载电流成正比。

根据 FHA 模型，谐振电容器上交流分量的峰值电压计算方式如下：

$$V_{Cr\_pk} = \frac{4}{\pi} nV_o \left| \frac{jf_n L_n Q_e + 1}{f_n^2 L_n} \right| \quad (4)$$

因此，谐振电容器电压在最小开关频率和最大负载下达到最大值。根据此公式，可计算出电流检测网络的各个元件。鉴于 FHA 的性质，需要通过实际硬件测试来验证最终电路参数。

表 7-1. 计算得出的电流检测网络元件

名称	功能	设计公式
$R_S$	将谐振电容器两端的交流电压传输到电流源	$R_S = \frac{V_{Cr\_pk}(max)^2}{2P_{R_S}(max)} \quad (5)$
$C_S$	谐振电容器上的阻断直流电压	$C_S = \frac{10}{R_S f_{min}} \quad (6)$
$R_P$	电流源的负载电阻器	$R_P = \frac{R_S}{V_{Cr\_pk}(max)} \pi \quad (7)$
$C_P$	滤波电容器	$C_P = \frac{10}{R_P f_{min}} \quad (8)$

### 7.3.3 栅极驱动器

半桥谐振转换器由占空比接近 50% 的可变频率方波电压控制。这使得半桥能够由栅极驱动器变压器轻松驱动。与半桥驱动器器件相比，栅极驱动器变压器提供了一种简单而可靠的解决方案，其中：

- 消除了对栅极驱动器电源的需求
- 可实现简化的布局
- 防止因变压器耦合而导致击穿
- 不需要门锁

UCC25600 集成了两个具有 0.4A 拉电流和 0.8A 灌电流能力的栅极驱动器，可直接驱动栅极驱动器变压器。

对于 LLC 谐振转换器，栅极驱动器信号精确对称至关重要。否则，谐振回路运行将是对称的。输出整流器的负载电流分布会不平衡，进而需要对功率级和热管理进行过度设计。

在 UCC25600 中，栅极驱动器输出经过精确修整，具有低于 50ns 的失配。尽管栅极驱动器信号相当对称，但仍建议在栅极驱动器变压器初级侧插入隔直电容器，以防止在快速瞬变期间发生变压器饱和。

### 7.3.4 过热保护

UCC25600 会持续检测其结温。当结温升至 160°C 以上时，该器件将进入过热保护模式，同时两个栅极驱动器会被主动拉至低电平。当结温降至 140°C 以下时，栅极驱动器通过软启动重新启动。

## 7.4 器件功能模式

### 7.4.1 突发模式运行

在轻负载条件下，谐振转换器通常会增加其开关频率并保持输出电压稳定。但是，由于变压器寄生电容器和整流二极管结电容器引起的振铃，能量可能通过这些电容器直接传输到负载。当该功率超过负载所需的功率时，输出电压将高于稳压电平。在这种情况下，进一步提高开关频率无济于事，因为能量传输到负载并不是通过功率级本身进行的。

为防止这种情况下出现输出过压，UCC25600 提供了突发模式运行功能。当控制环路需要高于 350kHz 的开关频率时，栅极驱动器会被禁用，同时功率级停止开关。当输出电压下降时，控制环路开始要求开关频率低于 330kHz，栅极驱动器恢复，并且功率级开始再次供电。这样可以对输出电压进行调节。

通过将最大开关频率限制在 350kHz 以下，可以轻松禁用这种突发模式。这样一来，控制环路绝不会要求开关频率高于 350kHz，并且不会发生突发模式运行。

### 7.4.2 VCC

当 VCC 上升到 10.5V 以上时，该器件会启用，并且在所有故障条件清除后，栅极驱动器通过软启动进行启动。当 VCC 降至 9.5V 以下时，该器件进入 UVLO 保护模式，并且两个栅极驱动器都被主动拉至低电平。当 VCC 上升到 20V 以上时，该器件进入 VCC 过压保护模式，并通过将两个栅极驱动器主动拉至低电平来禁用该器件。当 VCC 电压恢复到 18V 以下时，VCC 过压保护将通过软启动恢复。

## 8 应用和实施

### 备注

以下应用部分中的信息不属于 TI 元件规格，TI 不担保其准确性和完整性。TI 的客户负责确定元件是否适合其用途，以及验证和测试其设计实现以确认系统功能。

### 8.1 应用信息

UCC25600 器件是一款高性能谐振模式控制器，专为采用谐振拓扑的直流/直流应用而设计，尤其是 LLC 半桥谐振转换器。

#### 8.1.1 工作原理

软开关功能、高效率和长保持时间使得该 LLC 谐振转换器非常适合数字电视、交流/直流适配器和计算机电源等许多应用。图 8-1 展示了该 LLC 谐振转换器的原理图。

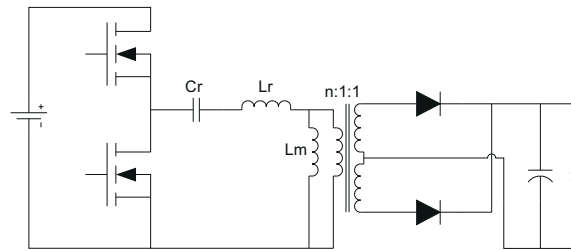


图 8-1. LLC 谐振转换器

LLC 谐振转换器基于串联谐振转换器 (SRC)。通过使用变压器的磁化电感，可在较宽的输入电压和负载范围内实现零电压开关。在多谐振作用下，即使开关频率高于或低于谐振频率时，也可以保持零电压开关。这简化了转换器设计，从而避免可能导致系统损坏的零电流开关区域。当转换器在标称输入电压下的工作频率接近其谐振频率时，可获得最佳效率。随着开关频率的降低，电压增益会显著增加。这样可使转换器的电压在输入电压下降时仍保持稳定。这些特性使得该转换器非常适合高压升压 PFC 预稳压器的输出操作，允许它在短暂的交流线路电压降低过程中保持电压稳定。

由于谐振转换器的性质，谐振组件上的所有电压和电流都近似为正弦波。LLC 谐振转换器的增益特性是根据一次谐波近似 (FHA) 进行分析的，这意味着所有电压和电流都被视为正弦波形，其频率与开关频率相同。

根据转换器的工作原理，可以将 LLC 谐振转换器简化为图 8-2 中所示的等效电路。

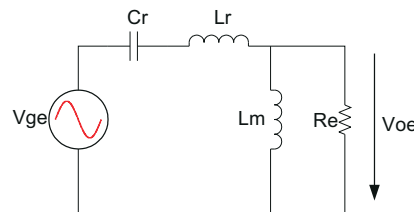


图 8-2. LLC 谐振转换器等效电路

在该等效电路中， $V_{GE}$  和  $V_{OE}$  分别是由半桥产生的电压和变压器初级侧上电压的基波谐波。这些电压可以通过傅里叶分析来计算。负载电阻器  $R_e$  是负载的等效电阻，其计算公式如下：

$$R_e = \frac{8}{\pi^2} n^2 R \quad (9)$$

根据此等效电路，不同开关频率下的转换器增益可使用以下公式计算：

$$\frac{V_o}{V_{DC}/2} = \left| \frac{\frac{j\omega L_m R_e}{j\omega L_m + R_e}}{\frac{j\omega L_m R_e}{j\omega L_m + R_e} + \frac{1}{j\omega C_r} + j\omega L_r} \right| \quad (10)$$

在该公式中， $V_{DC}/2$  是采用半桥结构时的等效输入电压。

表 8-1. 电路定义计算

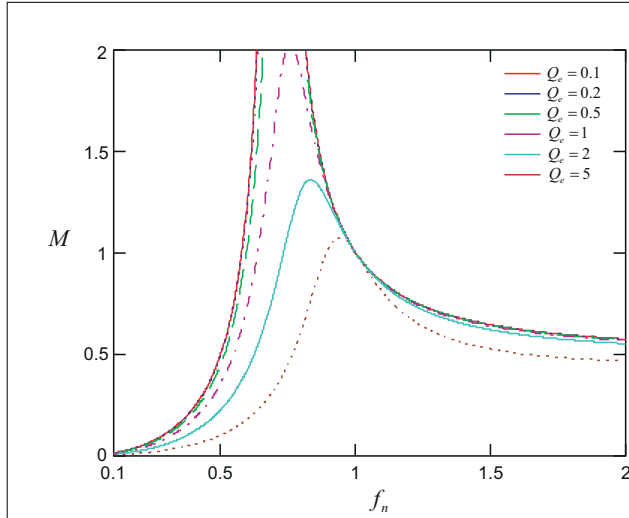
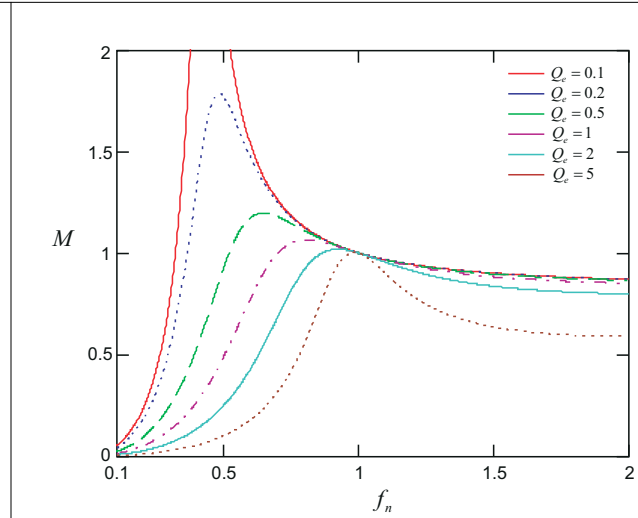
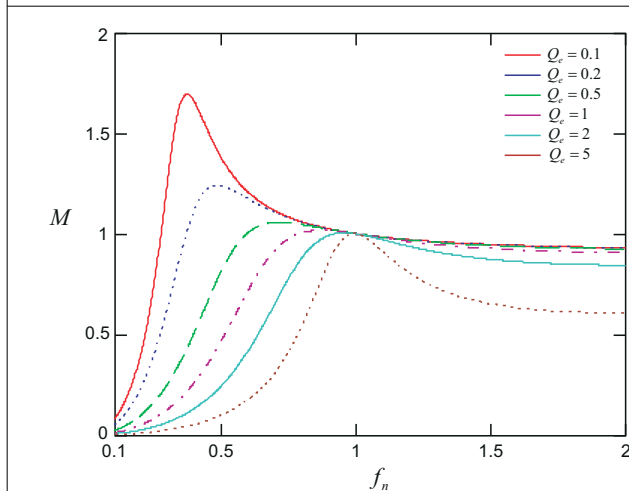
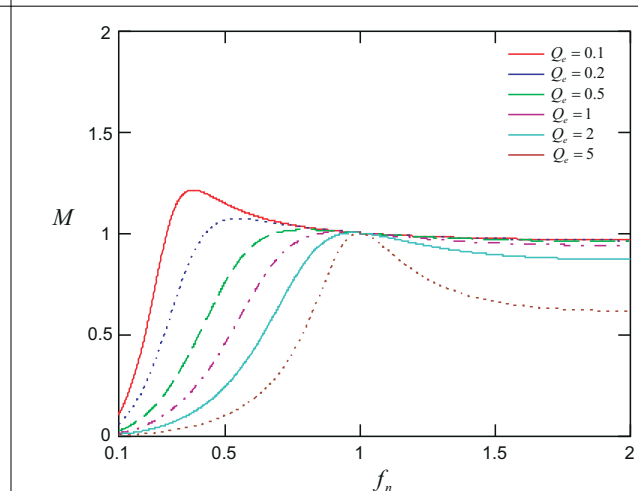
标称增益	谐振频率	品质因数	标称频率	电感比
$M = \frac{V_o}{V_{DC}/2} \quad (11)$	$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r C_r}} \quad (12)$	$Q_e = \frac{\sqrt{L_r / C_r}}{R_e} \quad (13)$	$f_n = \frac{f}{f_0} \quad (14)$	$L_n = \frac{L_m}{L_r} \quad (15)$

根据表 8-1 中的定义，不同开关频率下的转换器增益可以表示为：

$$M = \left| \frac{L_n \times f_n^2}{\left[ (L_n + 1) \times f_n^2 - 1 \right] + j \left[ (f_n^2 - 1) \times f_n \times Q_e \times L_n \right]} \right| \quad (16)$$

由于 FHA，该增益公式是一个近似计算。当开关频率偏离谐振频率时，误差会变大。不过，该公式可用作设计工具。最终结果需要通过基于时间的仿真或硬件测试来验证。

根据方程式 16，当开关频率等于谐振频率时， $f_n = 1$ ，转换器电压增益等于 1。图 8-3 至图 8-6 展示了不同负载和电感比条件下的转换器增益。

图 8-3. M 与  $f_n$  间的关系图 8-4. M 与  $f_n$  间的关系图 8-5. M 与  $f_n$  间的关系图 8-6. M 与  $f_n$  间的关系

根据其工作原理，LLC 谐振转换器通过脉冲频率调制 (PFM) 来控制。输出电压通过根据输入和输出条件调整开关频率来进行调节。通过将开关频率设置为接近谐振频率，可在标称输入电压下实现最优效率。当输入电压下降至低电平时，开关频率会降低以提高增益并保持稳压。

UCC25600 谐振半桥控制器使用可变开关频率控制来调节谐振回路阻抗并调节输出电压。这款 8 引脚封装器件集成了用于优化系统性能的关键功能，同时大大简化了设计和布局。



### 8.1.2 可调死区时间

谐振半桥转换器依靠 MOSFET 关断时的谐振回路电流来实现软开关并降低开关损耗。较高的关断电流可提供更多能量来为结电容器放电，同时会产生更多关断损耗。较小的关断电流可降低关断损耗，但需要更长的时间来对 MOSFET 结电容器进行放电和实现软开关。通过选择适当的死区时间，可以尽可能地减小关断电流，同时仍保持零电压开关，并实现出色的系统性能。

在 UCC25600 中，死区时间可通过 DT 引脚与地之间的单个电阻器进行调节。利用内部 2.25V 电压基准，流经电阻器的电流可设置死区时间。

$$t_d = 20ns + R_{dt} \times 24ns / k\Omega \quad (17)$$

为了防止 DT 引脚意外接地时发生击穿，可在 2 个栅极驱动器输出中插入至少 120ns 的死区时间。任何小于 120ns 的死区时间设置均会被限制为 120ns。

### 8.1.3 振荡器

在可变开关频率控制下，UCC25600 依赖内部振荡器来改变开关频率。振荡器由流出 RT 引脚的电流控制。除软启动期间外，栅极信号频率与流出 RT 引脚的电流之间的关系可以表示为：

$$f_s = \frac{1}{2} \frac{1}{\frac{6ns \times 1A}{I_{RT}} + 150ns} \approx I_{RT} \times 83Hz / \mu A \quad (18)$$

由于开关频率与电流成正比，因此通过限制流出 RT 引脚的最大和最小电流，可以轻松限制转换器的最小和最大开关频率。如图 8-7 所示，在 RT 引脚与地之间放置一个电阻器可以限制最小电流，而将一个电阻器与光耦合器串联可以限制最大电流。

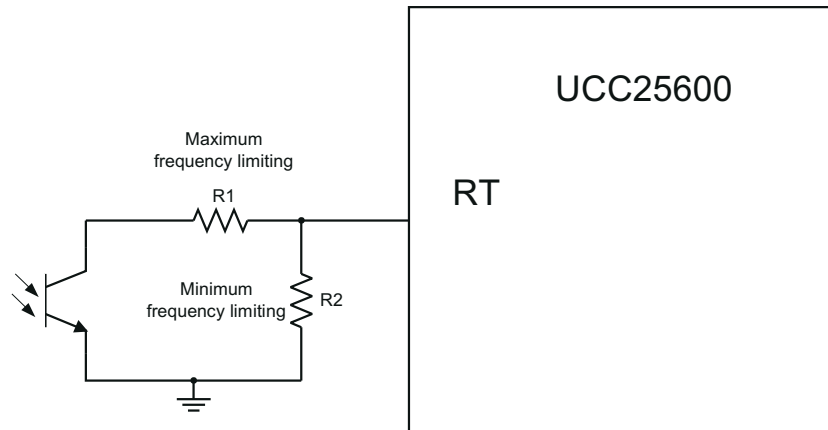


图 8-7. UCC25600 的最大和最小频率设置

限频电阻可以根据下列公式计算。

$$I_{f\max} = \frac{6ns}{\frac{1}{2f_{\max}} - 150ns} \tag{19}$$

$$I_{f\min} = \frac{6ns}{\frac{1}{2f_{\min}} - 150ns} \tag{20}$$

$$I_{f\max} = 2.5V \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \tag{21}$$

$$I_{f\min} = \frac{2.5V}{R_2} \tag{22}$$

### 8.2 典型应用

本设计示例介绍了 HPA341 EVM 设计，并概述了设计 300W LLC 谐振半桥转换器所需的设计步骤。该半桥转换器可在由 390V 直流电源供电的情况下，以最大 300W 的负载功率提供标称电压为 12V 的稳压输出电压，同时在初级和次级之间实现 AC-DC 离线应用的增强隔离。

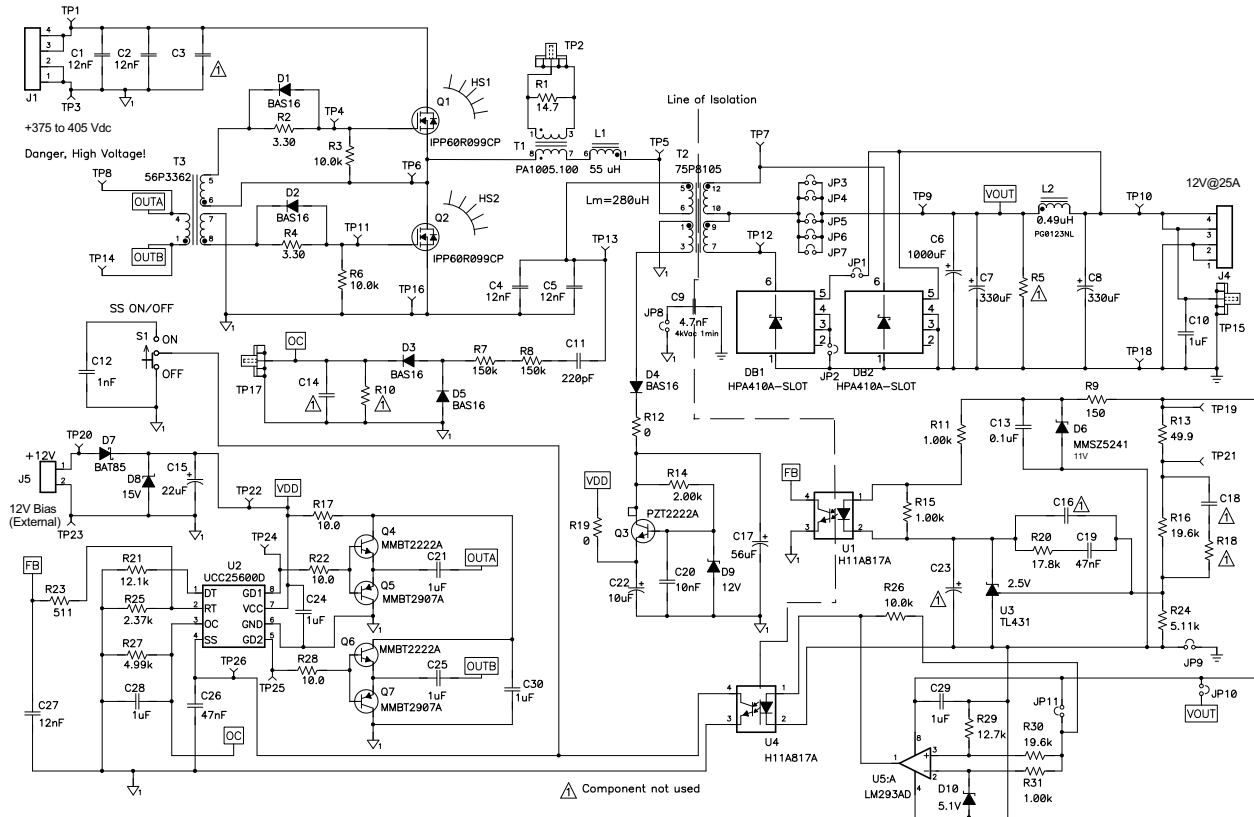


图 8-8. 典型应用原理图

### 8.2.1 设计要求

表 8-2. 设计要求

设计参数	目标值
输出电压	12V
额定输出功率	300W
输入直流电压范围	375V 至 405V
满载时的典型效率	91%
开关频率	85kHz 至 350kHz
谐振频率	130kHz

### 8.2.2 详细设计过程

1. 谐振电感器 (Lr)、谐振电容器 (Cr) 和半桥 LLC 的 Lm

a. 主变压器的匝数比：

$$n = N_p/N_s = 16.5 \quad (23)$$

b. 所需的最大谐振增益：

$$M_{\max} = 110\% \times n \times (2 \times V_{\text{out}})/(V_{\text{in\_min}}) = 110\% \times 16.5 \times (2 \times 12 \text{ V})/375 \text{ V} = 1.17 \quad (24)$$

c. 选择 Ln 和 Q。Ln 范围通常为 3 到 9。根据下面的曲线选择 Q，其中峰值增益必须高于或等于所需的最大谐振增益。根据以下曲线，Q 选择 0.45。

$$L_n = L_m/L_r = 5 \quad (25)$$

$$Q = \sqrt{(L_r / C_r) / R_{\text{eq}}} = 0.45 \quad (26)$$

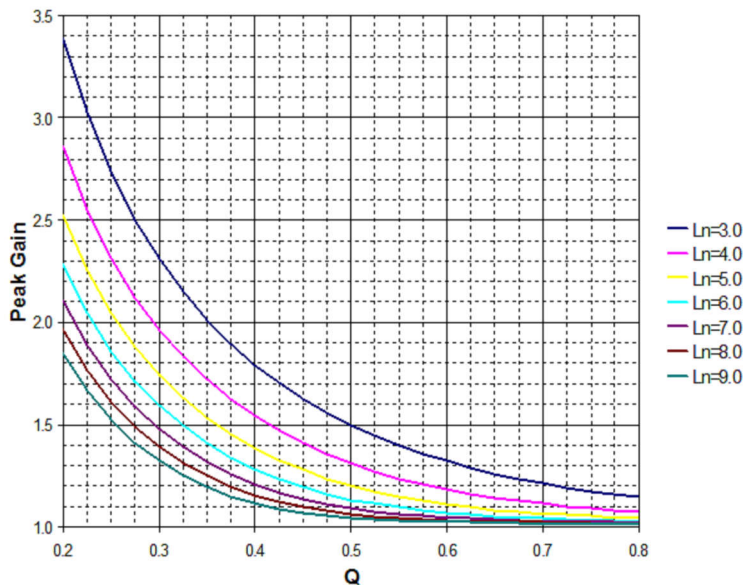


图 8-9. 峰值增益与 Q 间的关系

d. 计算等效初级电阻：

$$R_{\text{eq}} = (8 \times n^2 \times V_{\text{out}}^2)/(\pi^2 \times P_{\text{out}}) = (8 \times 4.6^2 \times 12^2)/(\pi^2 \times 300) = 108.6 \Omega \quad (27)$$

e. 选择 Cr：

$$C_r = 24\text{nF} \quad (28)$$

f. 计算  $L_r$  :

$$f_r = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{L_r \times C_r}} \quad (29)$$

g. 结合上面的两个公式 :

$$L_r = 55 \mu\text{H} \quad (30)$$

h. 计算  $L_m$  :

$$L_m = L_n \times L_r = 275 \mu\text{H} \quad (31)$$

2. 计算  $R_{dt}$ 。在 UCC25600 中，死区时间可通过 DT 引脚与地之间的单个电阻器进行调节。利用内部 2.25V 电压基准，流经电阻器的电流可设置死区时间。

$$t_d = 20\text{ns} + R_{dt} \times 24\text{ns}/k\Omega \quad (32)$$

其中

- $t_d = 300\text{ns}$
- $R_{dt} = 11.7\text{k}\Omega$

3. 计算  $C_{SS}$ 。更多详细信息，请参阅 [软启动](#)。

$$t_{ss} = 25 \text{ms} \quad (33)$$

$$t_{ss} = 2.8 \text{V}/5 \mu\text{A} \times C_{ss} \quad (34)$$

$$C_{ss} = 44.6 \text{nF} \quad (35)$$

4. 此处选择了 47nF 电容器。计算  $R_{T1}$  和  $R_{T2}$ 。更多详细信息，请参阅 [振荡器](#)。 $R_{T1}$  和  $R_{T2}$  用于限制最大开关频率和最小开关频率。 $R_{T1}$  和  $R_{T2}$  可以根据下列公式计算：

$$I_{fmax} = 6 \text{ns}/(1/2f_{max} - 150 \text{ns}) \quad (36)$$

$$I_{fmin} = 6 \text{ns}/(1/2f_{min} - 150 \text{ns}) \quad (37)$$

$$I_{fmax} = 2.5 \text{V}/(1/R_{T1} + 1/R_{T2}) \quad (38)$$

$$I_{fmin} = 2.5 \text{V}/R_{T2} \quad (39)$$

5. 结合上面的四个公式：

$$R_{T1} = 511 \Omega \quad (40)$$

$$R_{T2} = 2.37 \text{k}\Omega \quad (41)$$

6. 计算  $R_s$ 、 $C_s$ 、 $R_p$  和  $C_p$ 。更多详细信息，请参阅 [过流保护](#)。

$$R_s = 300 \text{k}\Omega \quad (42)$$

$$C_s = 22 \text{pF} \quad (43)$$

$$R_p = 4.99 \text{k}\Omega \quad (44)$$

$$C_p = 1 \mu\text{F} \quad (45)$$

### 8.2.3 应用曲线

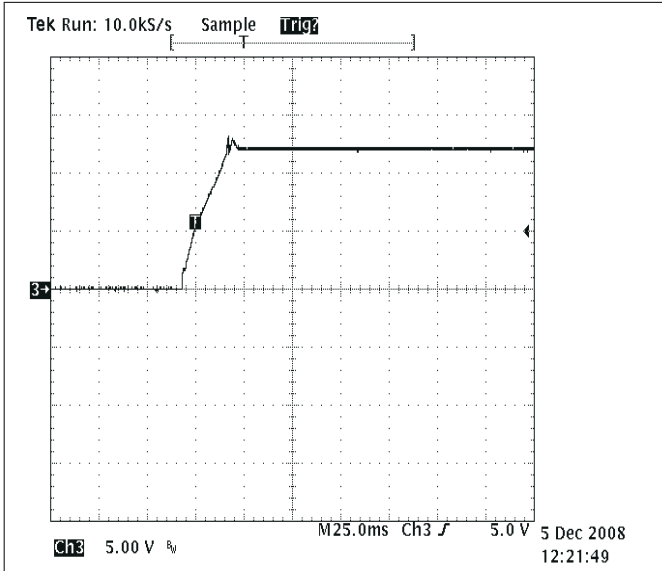


图 8-10. 典型的输出电压导通 (TP15)

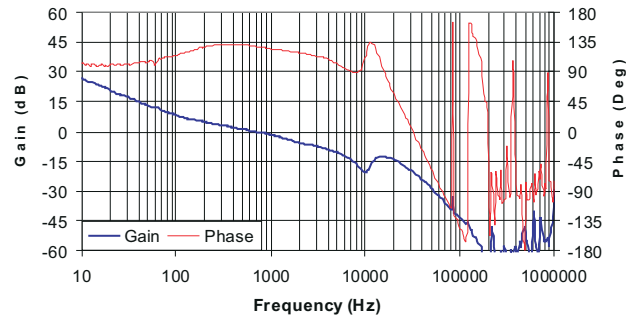


图 8-11. 完整系统环路补偿 (TP19 和 TP21)

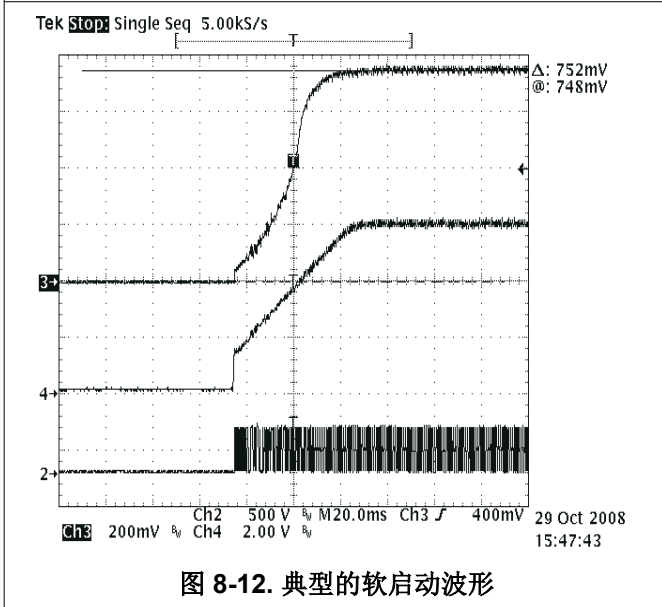


图 8-12. 典型的软启动波形

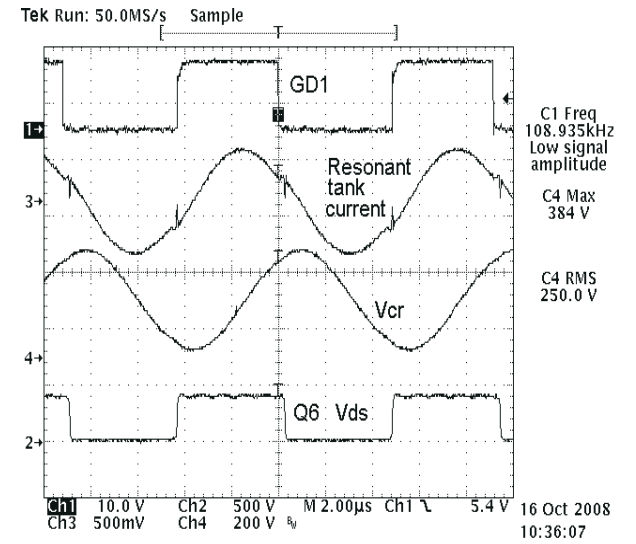


图 8-13. 典型的谐振回路电流和谐振电容器电压

## 9 电源相关建议

该器件的 VCC 电源端子需要在 VCC 端子和 GND 端子之间直接放置低 ESR 噪声去耦电容。推荐使用在整个温度范围内具有稳定电介质特性的陶瓷电容器，例如 X7R 或性能更佳电容器。根据应用的工作温度范围，或许可以使用 X5R，但是在高温和施加直流偏置时，其电容值的下降可能是无法接受的。避免使用温度稳定性差的电介质。

推荐的去耦电容器为 1 $\mu$ F 0805 尺寸的 50V X7R 电容器，并最好（但并非必要）另外使用一个较小的并联 100nF 0603 尺寸的 50V X7R 电容器。也可以使用额定电压更高的器件。不建议使用额定电压为 25V 的器件，因为施加直流偏置会导致有效电容值减小。

## 10 布局

### 10.1 布局指南

建议采用四层布局。

建议使用一个 1 $\mu$ F 陶瓷去耦电容器，将其尽可能靠近 VCC 端子和 GND 放置，并直接与这两个端子相连。

将 C<sub>SS</sub>、RDT、R<sub>p</sub>、C<sub>p</sub>、RT1 和 RT2 尽可能靠近 UCC25600 放置。

将稳压辅助电源连接至 VCC 引脚。

## 10.2 布局示例

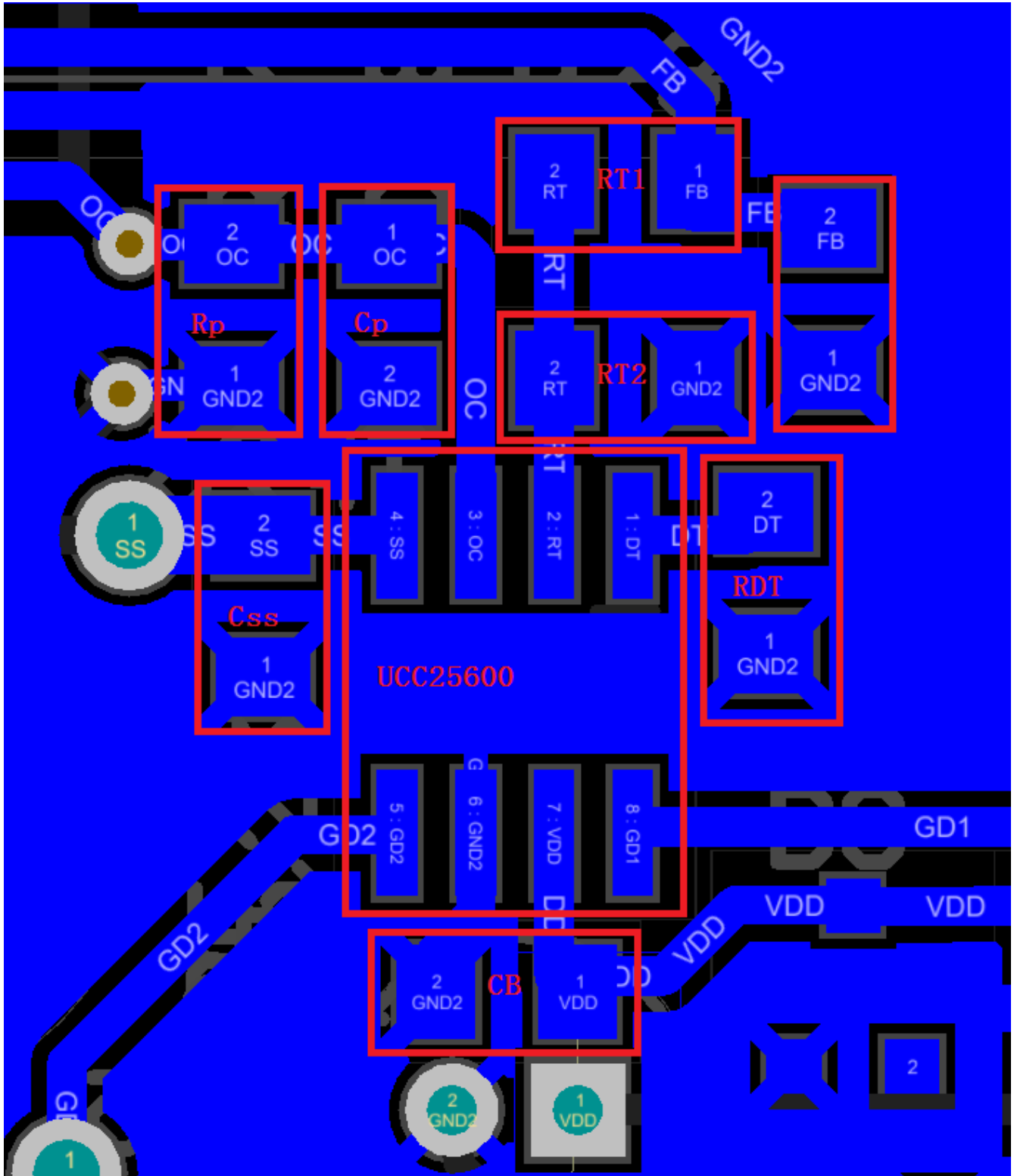


图 10-1. 电路板布局布线示例

## 11 器件和文档支持

### 11.1 支持资源

[TI E2E™ 中文支持论坛](#)是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题，获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的[使用条款](#)。

### 11.2 商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

DLP® is a registered trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

### 11.3 静电放电警告



静电放电 (ESD) 会损坏这个集成电路。德州仪器 (TI) 建议通过适当的预防措施处理所有集成电路。如果不遵守正确的处理和安装程序，可能会损坏集成电路。

ESD 的损坏小至导致微小的性能降级，大至整个器件故障。精密的集成电路可能更容易受到损坏，这是因为非常细微的参数更改都可能会导致器件与其发布的规格不相符。

## 12 术语表

[TI 术语表](#) 本术语表列出并解释了术语、首字母缩略词和定义。

## 13 机械、封装和可订购信息

以下页面包含机械、封装和可订购信息。这些信息是指定器件可用的最新数据。数据如有变更，恕不另行通知，且不会对此文档进行修订。有关此数据表的浏览器版本，请查阅左侧的导航栏。



**PACKAGING INFORMATION**

Orderable Device	Status (1)	Package Type	Package Drawing	Pins	Package Qty	Eco Plan (2)	Lead finish/ Ball material (6)	MSL Peak Temp (3)	Op Temp (°C)	Device Marking (4/5)	Samples
UCC25600D	ACTIVE	SOIC	D	8	75	RoHS & Green	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	25600	<a href="#">Samples</a>
UCC25600DR	ACTIVE	SOIC	D	8	2500	RoHS & Green	NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM	-40 to 125	25600	<a href="#">Samples</a>
UCC25600DRG4	ACTIVE	SOIC	D	8	2500	RoHS & Green	NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM	-40 to 125	25600	<a href="#">Samples</a>

(1) The marketing status values are defined as follows:

**ACTIVE:** Product device recommended for new designs.

**LIFEBUY:** TI has announced that the device will be discontinued, and a lifetime-buy period is in effect.

**NRND:** Not recommended for new designs. Device is in production to support existing customers, but TI does not recommend using this part in a new design.

**PREVIEW:** Device has been announced but is not in production. Samples may or may not be available.

**OBSOLETE:** TI has discontinued the production of the device.

(2) **RoHS:** TI defines "RoHS" to mean semiconductor products that are compliant with the current EU RoHS requirements for all 10 RoHS substances, including the requirement that RoHS substance do not exceed 0.1% by weight in homogeneous materials. Where designed to be soldered at high temperatures, "RoHS" products are suitable for use in specified lead-free processes. TI may reference these types of products as "Pb-Free".

**RoHS Exempt:** TI defines "RoHS Exempt" to mean products that contain lead but are compliant with EU RoHS pursuant to a specific EU RoHS exemption.

**Green:** TI defines "Green" to mean the content of Chlorine (Cl) and Bromine (Br) based flame retardants meet JS709B low halogen requirements of <=1000ppm threshold. Antimony trioxide based flame retardants must also meet the <=1000ppm threshold requirement.

(3) MSL, Peak Temp. - The Moisture Sensitivity Level rating according to the JEDEC industry standard classifications, and peak solder temperature.

(4) There may be additional marking, which relates to the logo, the lot trace code information, or the environmental category on the device.

(5) Multiple Device Markings will be inside parentheses. Only one Device Marking contained in parentheses and separated by a "~" will appear on a device. If a line is indented then it is a continuation of the previous line and the two combined represent the entire Device Marking for that device.

(6) Lead finish/Ball material - Orderable Devices may have multiple material finish options. Finish options are separated by a vertical ruled line. Lead finish/Ball material values may wrap to two lines if the finish value exceeds the maximum column width.

**Important Information and Disclaimer:**The information provided on this page represents TI's knowledge and belief as of the date that it is provided. TI bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TI has taken and continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TI and TI suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

## 重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司